

УДК 620.197.5:669.788

**В.І. Похмурський¹, Х.Б. Василів¹, В.А. Винар¹, Р.С. Мардаревич¹,
Н.Б. Рацька¹, Л.А. Арендар¹, І. Кулик²**

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України¹
Львівський національний університет ім. І.Франка²*

ВПЛИВ ВОДНЮ НА СТРУКТУРУ, МЕХАНІЧНІ ТА ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ФЕРИТО-ПЕРЛІТНИХ СТАЛЕЙ

Проаналізовано вплив електролітичного наводнювання за густини струму 1...2 А/дм² на структуру і фізико-механічні властивості поверхневих шарів армко-заліза та ферито-перлітних сталей. Показано, що середньовуглецеві сплави з ферито-перлітною структурою поглинають більше дифузійно-рухливого водню, ніж армко-залізо (ферит) та сталь У8 (перліт). На вміст залишкового водню концентрація вуглецю впливає значно менше. Зі збільшенням концентрації вуглецю в сплавах їх пошкоджуваність при наводнюванні зменшується. В армко-заліза і сталі 20 макропошкодження типу тріщин і блістерів локалізуються на глибині до 300 мкм, а їх розміри досягають 100 мкм. Зміна мікротвердості, коефіцієнта пластичності, модуля Юнга наводнених шарів досягає ~10%. При електролітичному наводнюванні вуглецевих сталей 45 і У8 відбувається диспергування тонкої структури зерен перліту. При цьому зберігається стабільність механічних та трибологічних характеристик, що свідчить про локалізацію руйнувань у тонкому поверхневому шарі, розвантаження концентраторів внутрішніх напружень, і видалення надлишкового водню з металу.

Ключові слова: електролітичне наводнювання, залізо, сталь, ферит, перліт, наноіндентування, мікротвердість, блістер, фрагментація.

**В.И. Похмурский¹, Х.Б. Васильев¹, В.А. Вынар¹, Р.С. Мардаревич¹,
Н.Б. Рацька¹, Л.А. Арендар¹, И. Кулик²**

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА СТРУКТУРУ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ФЕРРИТО- ПЕРЛИТНЫХ СТАЛЕЙ

Проанализировано влияние электролитического наводороживания при плотности тока 1 ... 2 А / дм² на структуру и физико-механические свойства поверхностных слоев армко-железа и феррито-перлитных сталей. Показано, что среднеуглеродистые сплавы с феррито-перлитной структурой поглощают больше диффузионно-подвижного водорода, чем армко-железо (феррит) и сталь У8 (перлит). На содержание остаточного водорода концентрация углерода влияет гораздо меньше. С увеличением концентрации углерода в сплавах их повреждаемость при наводороживании уменьшается. В армко-железе и стали 20 макроповреждения типа трещин и блистеров локализируются на глубине до 300 мкм, а их размеры достигают 100 мкм. Изменение микротвердости, коэффициента пластичности, модуля Юнга наводороженных слоев достигает ~10%. При электролитическом наводороживании углеродистых сталей 45 и У8 происходит диспергирование тонкой структуры зерен перлита. При этом сохраняется стабильность механических и трибологических характеристик, что свидетельствует о локализации разрушений в тонком поверхностном слое, разгрузке концентраторов внутренних напряжений и удалении избыточного водорода из металла.

Ключевые слова: электролитическое наводороживание, железо, сталь, феррит, перлит, наноиндентирование, микротвердость, блистер, фрагментация.

**V. Pokhmurskii¹, Ch. Vasyliv¹, V. Vynar¹, R. Mardarevych¹,
N. Ratska¹, L. Arendar¹, I. Kulyk²**

INFLUENCE ON HYDROGEN STRUCTURE, MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF THE SURFACE LAYERS FERRITE-PEARLITIC STEELS

The influence of electrolytic hydrogenation at current density of 1 ... 2 А / дм² on the structure and physico-mechanical properties of the surface layers of Armco-iron and ferrite-pearlitic steels. It is shown that alloys with ferrite-pearlitic structure absorb more mobile hydrogen than Armco-iron (ferrite) and steel У8 (perlite). Content of residual hydrogen is much less affected from the concentration of carbon. Damage of alloys after hydrogenation reduces with increasing of carbon concentration. In Armco-iron and steel 20 damage type cracks and blisters are located at a depth of 300 μm, and their size up to 100 μm. Changing the microhardness, ductility coefficient, Young's modulus hydrogenated layers reaches ~10%. The fine structure of perlite grains in steels 45 and У8 is dispersing after electrolytic hydrogenation. Damages are located in a thin surface layer so this provides the stability of mechanical and tribological characteristics of alloys.

Keywords: electrolytic hydrogenation, iron, steel, ferrite, pearlite, nanoindentation, mikrotverdist, blister, fragmentation.

Водень, що дифундує у метал, може призводити до незворотних пошкоджень структури, зокрема, внутрішніх тріщин і блістерів. Вони виникають у багатьох кристалічних матеріалах (бронзі, алюмінії, армко-залізі, сталях різних класів) за відсутності зовнішнього навантаження, коли концентрація водню перевищує критичну [1-5].

Вплив водню проявляється у зниженні сили когезії між атомами у кристалічній ґратці та підвищенні його локального тиску у дефектах структури внаслідок рекомбінації атомів водню у

молекулу [4]. У сталях такими пастками для водню можуть бути границі зерен у перліто-феритних структурах, карбіди, присутні у мартенситі відпалу [6], дефекти типу MnS , Al_2O_3 , дислокації тощо [4, 7-9]. Поширення мікротріщин і їх з'єднання призводить до формування водневих блістерів і макротріщин [4, 7].

Критичні концентрації водню в сталях, які призводять до виникнення незворотних пошкоджень, залежать не лише від їх хімічного складу, а й мікроструктури, густини упаковки атомів у кристалічній ґратці, її дефектності [3, 4]. Так, зі збільшенням концентрації вуглецю у сталях зростає вміст карбідної фази, в якій водень практично нерозчинний, і зменшується кількість феритної складової, тому розчинність водню знижується [10]. Водночас зі збільшенням вмісту вуглецю зростає площа міжфазної поверхні ферит-цементит, яка внаслідок різкої відмінності типів кристалічної ґратки фериту і цементиту має високу дефектність і здатна утримувати в 2-3 рази більшу кількість водню порівняно з границями зерен фериту [11]. Таким чином, вплив концентрації вуглецю у ферито-перлітних сталях на абсорбцію водню і їх пошкоджуваність неоднозначний, про що свідчать численні дослідження [12-19].

Постановка завдань. Мета даної роботи - проаналізувати вплив електролітичного наводнювання на структуру, мікромеханічні та трибологічні властивості армко-заліза і ферито-перлітних сталей з різним вмістом вуглецю.

Методика експерименту. Електролітичне наводнювання попередньо відпалених у вакуумі зразків армко-заліза, сталей 20, 45, У8 реалізували шляхом катодної поляризації за кімнатної температури в 1 N розчині H_2SO_4 з домішкою 10 mg/l As_2O_3 для гальмування рекомбінації водню на поверхні зразків. Тривалість поляризації 1 h, густина катодного струму 1,0 ... 2,0 A/dm².

Об'єм дифузійно-рухливого водню, десорбованого зі зразка, визначали за допомогою приладу евідометричного типу, наповненого дибутиловим ефіром фталевої кислоти $C_6H_4(COOC_4H_9)_2$ як запірною рідиною. Щоб диференціювати кількість водню, локалізованого в різних пастках структури, зразок нагрівали в електропечі до температури 300⁰C.

Концентрацію залишкового водню в зразках визначали за допомогою аналізатора BRUKER Galileo G8.

Мікроструктуру сталей вивчали за допомогою сканівного електронного мікроскопа EVO 40XVP з системою мікрорентгеноспектрального аналізу енергодисперсійного рентгенівського спектрометра INCA ENERGY 350.

Для визначення механічних властивостей поверхневих мікрооб'ємів досліджуваних матеріалів застосовували метод динамічного інденування з використанням установки «Мікрон-гама» [20]. Крім того, застосовували скретч-метод, що базується на безперервній реєстрації сили опору руху алмазного інденатора по поверхні з заданим навантаженням (1 N) і швидкістю переміщення (0,2 mm/s) [21].

Результати експерименту та їх обговорення. Під час електролітичного наводнювання у приповерхневі шари металів проникають іони активного дифузійно-рухливого водню, енергія активації якого близька до високотемпературної ($\approx 12,6$ kJ/mol). Внаслідок дифузії його концентрація в мікрodefектах кристалічної ґратки може суттєво перевищувати рівноважну [7]. Атоми водню локалізуються у дефектах – на границях фаз чи в околі включень та об'єднуються в молекули. При молізації тиск водню в дефектах суттєво збільшується, що призводить до виникнення і поширення мікротріщин, формування блістерів, через які дифузійно-рухливий газ виходить з металу. Встановлено, що максимальний руйнівний вплив спостерігається, коли ефузія водню з металу досягає найбільшої активності, тобто водень має найвищу дифузійну рухливість і активність. У пастках структури кристалічної ґратки залишається водень з утрічі вищою енергією активації ($\sim 37...42$ kJ/mol) – т.зв. залишковий, який малорухливий і видаляється з металу за температури понад 300⁰C.

Як видно з рис.1, зі збільшенням концентрації вуглецю в сплавах заліза вміст дифузійно активного водню у 2-5 разів перевищує концентрацію залишкового. Найменше дифузійного водню в армко-залізі і сталі У8 зі структурами відповідно фериту і перліту. Змішані ферито-перлітні структури містять дифузійно-активного водню відповідно у 4 і 6 разів більше.

У фериті водень слабозрозчинний і локалізується переважно на границях зерен. Зі збільшенням вмісту вуглецю в сталях об'єм перліту і площа високодефектної міжфазної поверхні ферит-цементит зростає, але коефіцієнт дифузії водню знижується (рис.2), оскільки цементит є дифузійним бар'єром. Крім того, для перліту характерна різна швидкість дифузії водню через неоднаково орієнтовані пластини цементиту [18]. Тому у перлітній сталі У8 концентрація водню нижча, ніж у ферито-перлітній сталі 45.

Зі збільшенням концентрації вуглецю в сталях зменшується також вміст залишкового водню. Зі збільшенням концентрації вуглецю у сталях зростає вміст карбідної фази, в якій водень практично нерозчинний, і зменшується кількість феритної складової. Поєднання цих факторів призводить до зменшення концентрації залишкового водню.

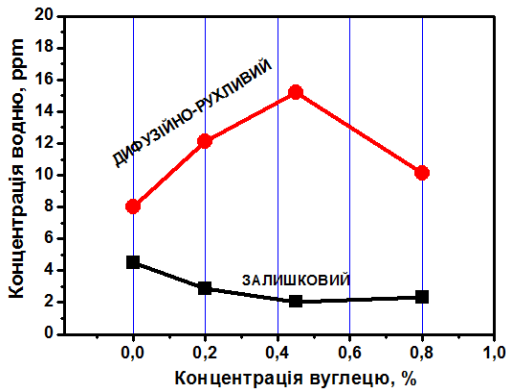


Рис.1. Концентрація дифузійного і залишкового водню в армко-залізі і сталях після електролітичного наводнювання за густини струму 1А/дм² протягом 1 год.

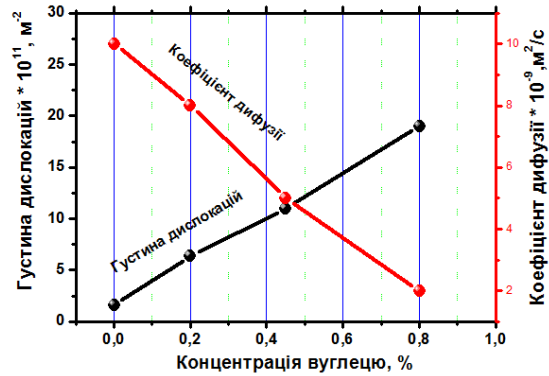
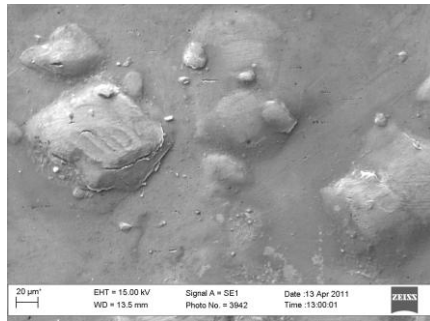
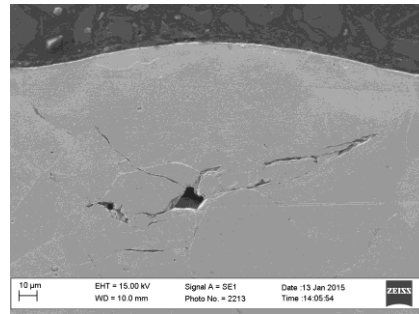


Рис.2. Залежність густини дислокацій у сталях (1) і коефіцієнта дифузії водню (2) від вмісту вуглецю в сталях.

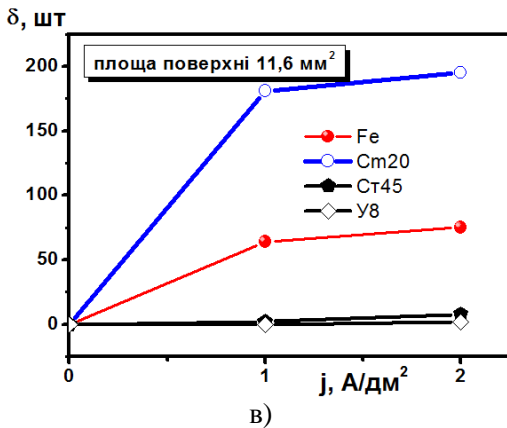
Після катодної поляризації протягом 1 h за густини струму 1 і 2 А/дм² на поверхні всіх досліджуваних металів спостерігаються блістери (рис.3,а). На армко-залізі вони здебільшого великі (100 μm), глибина пошкоджуваності металу становить не менше, ніж 300 μm. Структура поверхні блістера свідчить про деформацію зсувом тонких поверхневих шарів матеріалу. На поверхні сталі 20 кількість блістерів утричі вища, ніж на армко-залізі, їх діаметр, як правило, не перевищує 10 μm. Зі збільшенням густини струму до 2 А/дм² кількість блістерів зростає несуттєво (рис.3,б). На сталях 45 і У8 після наводнювання утворюється значно менше блістерів (відповідно 0,1 і 0,01 на мм²), їх розміри на сталі 45 не перевищують 10, а на У8 – 1 μm.



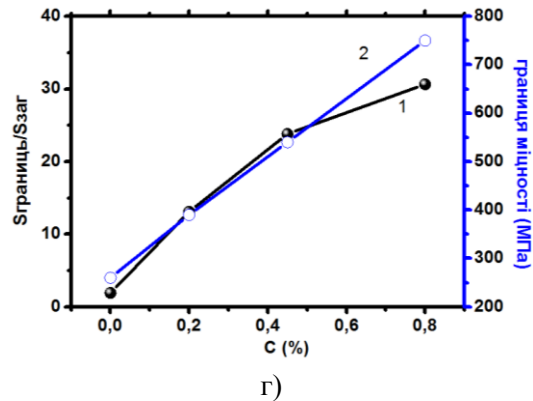
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Мікроструктура поверхні (а) і підповерхневих шарів (б) наводненого армко-заліза; в- вплив режимів наводнювання на кількість блістерів на поверхні заліза та його сплавів; г- збільшення площі міжфазної поверхні ферит-цементит (1) і границі міцності σ_B сталей (2) залежно від концентрації вуглецю.

Таким чином, зі збільшенням концентрації вуглецю в сталях від 0,02 до 0,8 mass.% їх пошкоджуваність типу блістерінгу внаслідок наводнювання зменшується. Це може бути пов'язано як з підвищенням їх міцності, так і зі збільшенням площі границь між фазами фериту і цементиту в перлітних структурах, які можуть виконувати роль колекторів для водню (рис.3,в).

При дослідженні тонкої структури поверхні електролітично наводнених сталей 45 і У8 (при збільшенні $\times 5000$) виявлено руйнування перлітних зерен: подрібнення пластинок фериту та цементиту та зміну орієнтації їх фрагментів на десятки градусів (рис.4). Пошкодження ґратки локалізуються на глибині до 1 μm (рис.4б). На дифрактограмах наводнених зразків виявлено незначне зменшення розмірів когерентно розсіювальних блоків цементиту та збільшення відносної мікродоформи ґратки, що проявляється у виникненні тріщин і фрагментації цементиту (рис.5).

Водень не проникає через цементит сталей, тому границі між цементитом і феритом для нього є дифузійними бар'єрами. Міжфазна поверхня ферит-цементит внаслідок різкої відмінності кристалічної будови фаз має високу дефектність і здатна утримувати велику кількість водню. При цьому в локальних ділянках виникають високі тиски, що створюють внутрішні напруження. Якщо вони перевищують сили когезії, утворюються мікротріщини, відбувається подрібнення структури та зміна орієнтації фрагментів зерен. Ще однією причиною утворення тріщин є виділення метану внаслідок взаємодії водню з цементитом.

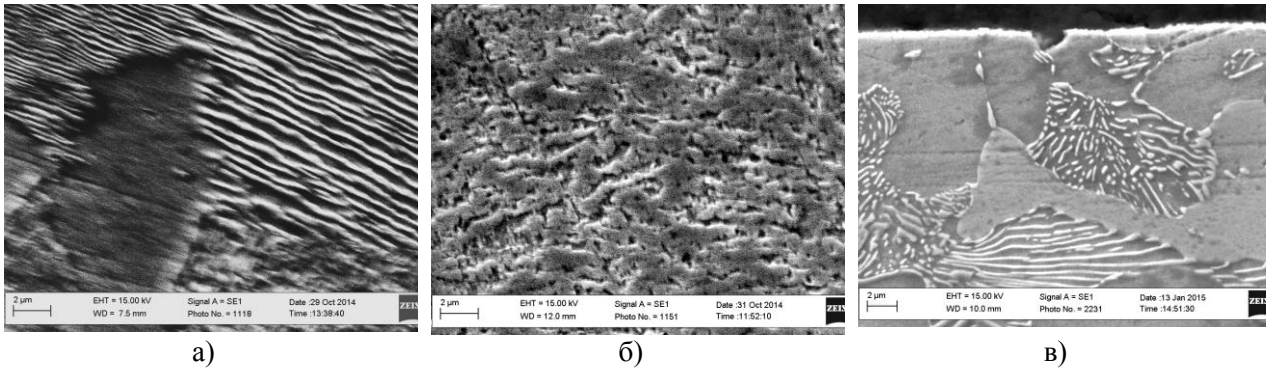


Рис.4. Перліт на поверхні сталі 45 у вихідному стані (а) і після електролітичного наводнювання (б), поперечний переріз наводненої сталі 45; $\times 5000$.

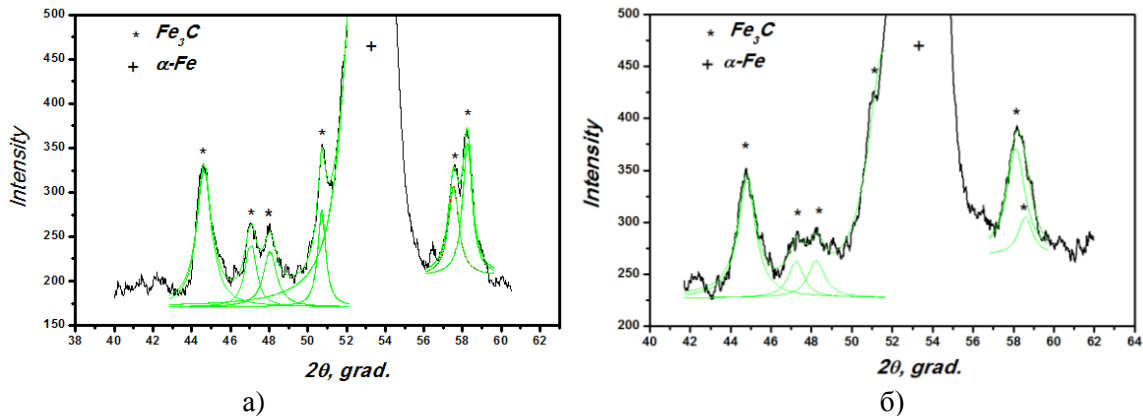


Рис.5. Фрагменти дифрактограм вихідного (а) і наводненого (б) зразків сталі У8.

Трансформація структури приповерхневих шарів наводнених зразків супроводжується зміною їх механічних властивостей. Механічні властивості поверхневих мікрооб'ємів досліджуваних матеріалів аналізували за допомогою методу динамічного наноіндентування. Діаграми навантаження свідчать про значний вплив наводнювання на пружно-пластичні властивості армко-заліза і низьковуглецевої сталі 20 та значно менший – сталей 45 і У8 (рис.6).

Зокрема, після електролітичного наводнювання армко-заліза спостерігається незначне збільшення поверхневої мікротвердості за густини струму наводнювання 1 A/dm^2 , що корелює з підвищенням рівня внутрішніх напружень. Зі збільшенням густини струму до 2 A/dm^2 рівень внутрішніх напружень та мікротвердість армко-заліза знижуються, оскільки дифузійно рухливий водень частково видаляється з металу, зокрема, через утворені тріщини і блістери. Після

наводнювання також спостерігається зниження пластичності армко-заліза (на 10-12%), і збільшення модуля Юнга (на 10%) (рис.6).

Характеристики діаграм навантаження сталі 20 після наводнювання змінюються подібно до армко-заліза (рис.6). Спостерігається незначне підвищення мікротвердості поверхневих шарів після наводнювання за густини струму 1 A/dm^2 . Зі збільшенням густини струму до 2 A/dm^2 відбувається часткова релаксація напружень внаслідок дегазації поверхні через блістери, тому мікротвердість дещо знижується, але залишається вищою, ніж у вихідному стані. Після наводнювання спостерігається зниження пластичності матеріалу та підвищення значень модуля Юнга (рис.6).

Діаграми навантаження сталей 45 і У8 до і після наводнювання свідчать про його несуттєвий вплив на міцнісні властивості металів: рівень внутрішніх напружень, мікротвердість і коефіцієнт пластичності після наводнювання змінюються на 2-3% (рис.6).

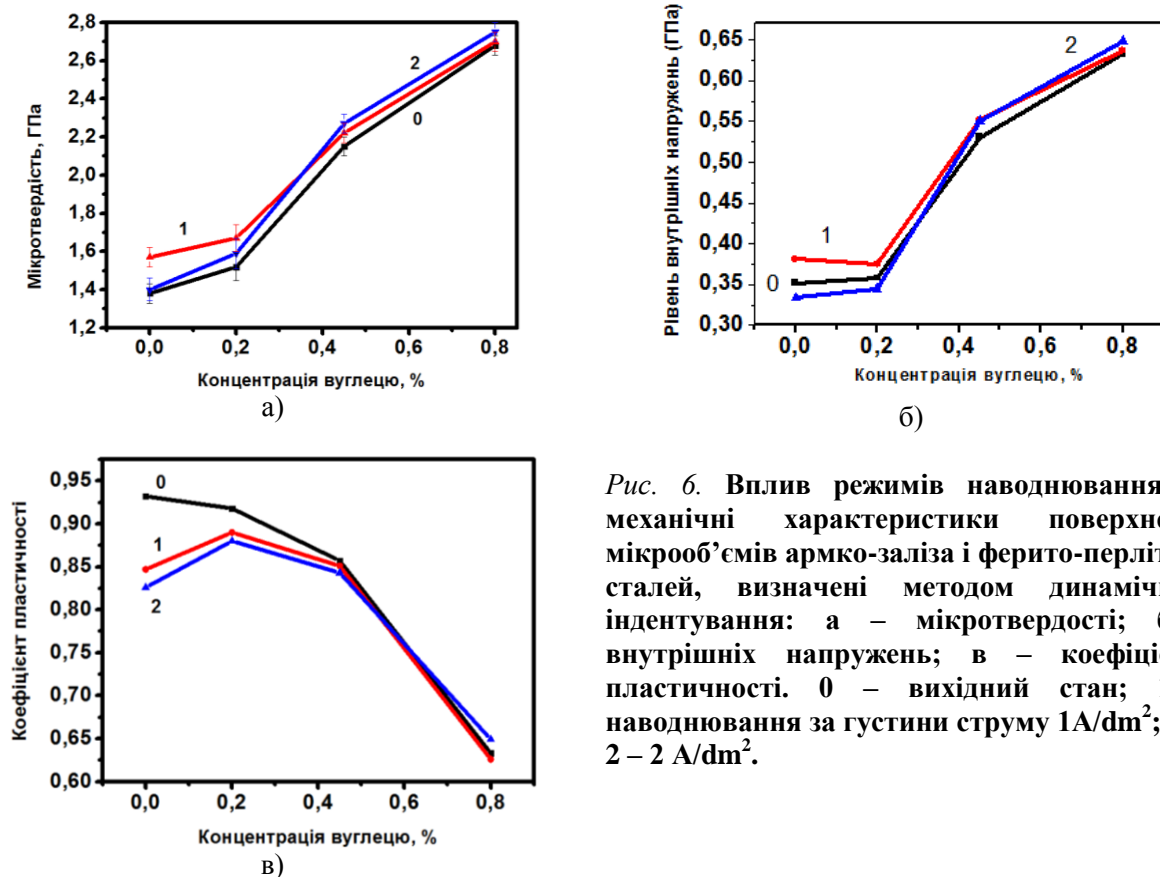


Рис. 6. Вплив режимів наводнювання на механічні характеристики поверхневих мікрооб'ємів армко-заліза і ферито-перлітних сталей, визначені методом динамічного індентування: а – мікротвердості; б – внутрішніх напружень; в – коефіцієнта пластичності. 0 – вихідний стан; 1 – наводнювання за густини струму 1 A/dm^2 ; 2 – 2 A/dm^2 .

Вплив наводнювання на міцнісні властивості поверхневих шарів досліджуваних матеріалів визначали також за допомогою методу скретч-тестування. Виявлено, що після наводнювання армко-заліза за густини струму 1 і 2 A/dm^2 сила опору руху індентора зростає відповідно на 40 і 15% (рис. 7,а). Виявлено великі осциляції сили тертя (до 15%), що зумовлено схоплюванням контактуючих поверхонь. Ширина доріжки тертя ненаводненого армко-заліза практично однакова по всій його довжині і свідчить про пластичне витіснення матеріалу з зони індентування. Поза зоною трека не спостерігається тріщин чи інших пошкоджень. Після наводнювання ширина трека на 10-15% вужча внаслідок зменшення об'єму витісненого матеріалу, зумовленого зниженням його пластичності. Подібні результати скретч-випробування сталі 20. У вихідному стані виявлено пластичне витіснення металу з зони тертя. Після наводнювання за густини струму як 1, так і 2 A/dm^2 доріжка тертя вужча, має зигзагоподібні краї і сліди сколів навколо трека внаслідок крихкого руйнування поверхні. Опір переміщенню індентора дещо зростає після наводнювання за густини струму 1 A/dm^2 , що корелює з підвищенням мікротвердості поверхневих шарів, і суттєво знижується за густини струму 2 A/dm^2 внаслідок пошкодження поверхні (рис.7б).

Застосування скретч-методу до сталей 45 і У8 виявило незначне (на 3-5%) зниження сили опору наводнених матеріалів переміщенню індентора (рис.7в,г), що не залежить від густини струму наводнювання. Таким чином, після електролітичного наводнювання сталей 45 і У8 за густини струму $1 \dots 2 \text{ A/dm}^2$ міцнісні характеристики їх поверхневих шарів зберігаються.

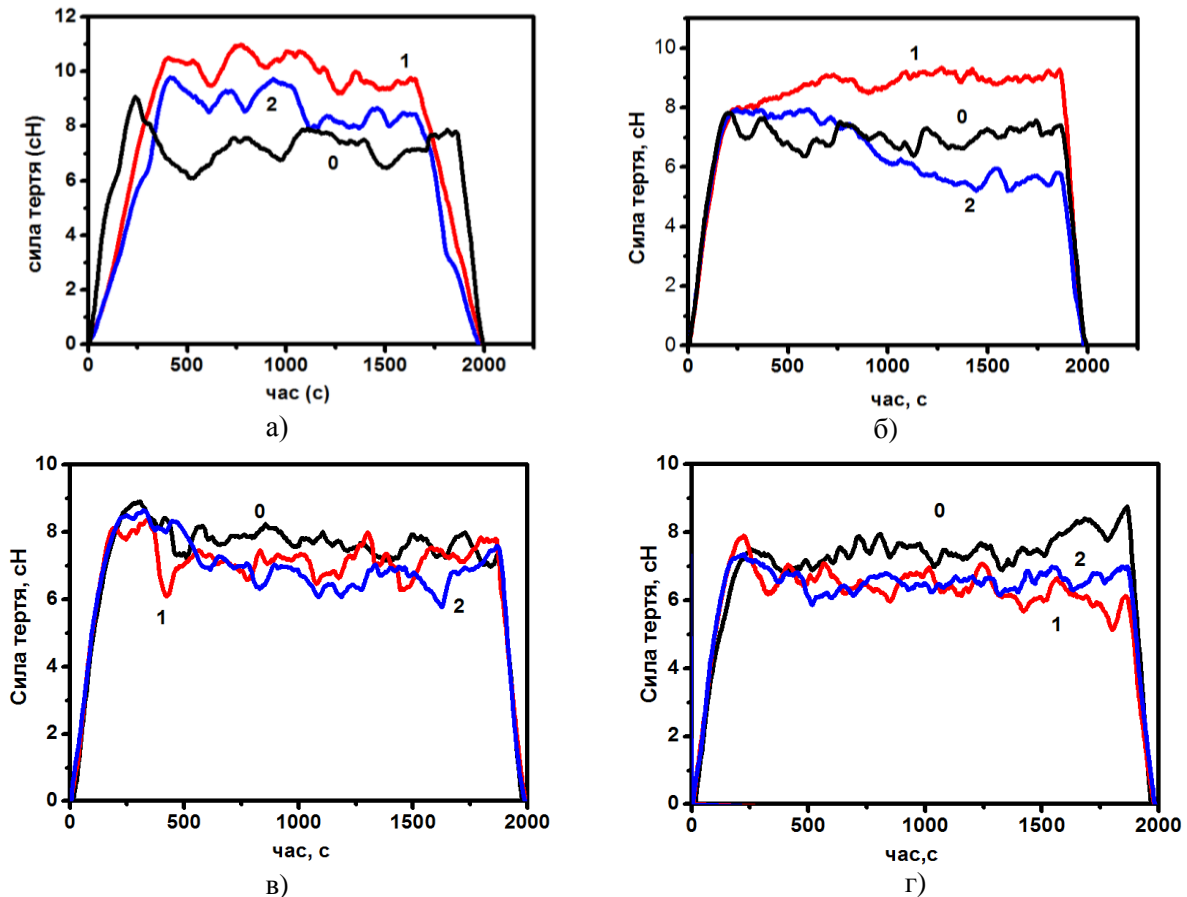


Рис. 7. Результати скретч-тестування армко-заліза (а), сталей 20 (б), 45 (в) і У8 (г): 0 – у вихідному стані; 1 – після наводнювання за густини струму 1 A/dm^2 ; 2 – 2 A/dm^2 .

При електролітичному насиченні сталей водень розподіляється у поверхневих шарах нерівномірно. Дифузія водню протікає по границях зерен та структурних складових, що вимагають меншої енергії активації, зокрема, у фериті. Розчинність водню у фериті дуже мала, тому він накопичується у дефектах структури, що призводить до виникнення макротріщин та блістерів, що спостерігається в армко-заліза і низьковуглецевих сталях.

З підвищенням концентрації вуглецю в сталях зменшується кількість феритної складової і зростає об'єм перліту. Водночас збільшується площа міжфазної поверхні ферит-цементит. Водень не проникає через цементит сталей, тому границі між цементитом і феритом для нього є дифузійними бар'єрами. Міжфазна поверхня ферит-цементит внаслідок різкої відмінності кристалічної будови фаз має високу дефектність і здатна утримувати велику кількість водню. При цьому в локальних ділянках виникають високі тиски, що створюють внутрішні напруження. Якщо вони перевищують сили когезії, утворюються мікротріщини, відбувається подрібнення структури та зміна орієнтації фрагментів зерен. Це призводить до розвантаження концентраторів внутрішніх напружень, локалізації руйнувань у тонкому поверхневому шарі і видалення надлишкового водню з металу. Тому у наводнених сталей 45 і У8 кількість і розміри блістерів суттєво менші, ніж в армко-заліза та сталі 20, зберігається стабільність механічних та трибологічних характеристик.

Висновки. Показано, що внаслідок електролітичного наводнювання за густини струму $1 \dots 2 \text{ A/dm}^2$ середньовуглецеві сплави з ферито-перлітною структурою поглинають більше дифузійно-рухливого водню, ніж армко-залізо (ферит) та сталь У8 (перліт), що пов'язано зі збільшенням площі міжфазної поверхні ферит-цементит. На вміст залишкового водню концентрація вуглецю впливає значно менше. У фериті водень слабозрозчинний і локалізується переважно на границях зерен. Зі збільшенням вмісту вуглецю в сталях об'єм перліту і площа високодефектної міжфазної поверхні ферит-цементит зростає, але коефіцієнт дифузії водню знижується, оскільки цементит є дифузійним бар'єром для водню.

При наводнюванні армко-заліза і сталі 20 макропошкодження типу тріщин і блістерів локалізуються на глибині до 300 μm , а їх розміри досягають 100 μm . Зміна мікротвердості, коефіцієнта пластичності, модуля Юнга наводнених шарів досягає 9-10%.

При електролітичному наводнюванні сталей 45 і У8 відбувається диспергування тонкої структури зерен перліту. При цьому зберігається стабільність механічних та трибологічних характеристик, що свідчить про локалізацію руйнувань у тонкому поверхневому шарі, розвантаження концентраторів внутрішніх напружень, і видалення надлишкового водню з металу.

Список посилань

1. C.N.Panagoupolos, A.S.Ei-Amoush, Agathocleous, Hydrogen-induced cracking and blistering in α -brass, Corros.Sci. 40(1998) 1837-1844.
2. C.N. Panagoupolos, E.OP. Georgiou, The effect of hydrogen charding on the mechanical behavior of 5083 wrought aluminium alloy, Corros.Sci (2009) 1197-1200.
3. M. Smialowski, Cracking and failure mechanism, Initiation of hydrogen induced cracking in iron and iron alloys, in: R.Oriani, J.P.Hirth, M.Smialowski (Eds.), Hydrogen degradation of ferrous Alloys, Noyes Publications, New Jersey, 1985, pp.561-578.
4. D. Perez Escobar, C. Minambres, L. Duprez, K. Verbeken, M. Verhaege Internal and surface damage of multiphase steels and pure iron after electrochemical hydrogen charging.– Corrosion Science.– 53.– 2011.– P. 3166–3176.
5. Похмурський В.І., Василів Х.Б. Вплив водню на тертя і зношування металів (огляд).- Фізико-хімічна механіка матеріалів.-2012.-№2.-С. 5-17.
6. E.Villalba, A.Atrems, Hydrogen embrittlement and rock bolt stress corrosion cracking, Eng.Fail Anal. 16 (2009) 164-175.
7. Карпенко Г.В., Крипякевич Р.И. Влияние водорода на свойства стали.– М.: Металлургия, 1962.–196 с.
8. K.Horikawa, H.Okada, H.Kobayashi, W.Urushibara Detection of hydrogen evolution during tensile deformation and fracture in carbon steel.- Materials transactions, vol.50, No 11.-2009.-P.2532-2540.
9. D.P. Escobar, V.Verbeken, L.Duprez. M.Vesharge Experimental evaluation of the hydrogen distribution in steel by thermal desorption spectroscopy, in: B.P.Somerday, P.Sofronis, R.Jones (Eds.) Proceedings International Conference on effects of Hydrogen on materials, ASM International, 2009, pp.477-484.
10. Арчаков Ю.И. Водородная коррозия стали. –М.:Металлургия, 1985. –192 с.
11. K Ichitani, M Kanno Visualization of hydrogen diffusion in steels by high sensitivity hydrogen microprint technique.- Science and Technology of Advanced Materials.- 4.- 2003.- P. 545–551.
12. K.Horikawa, H.Okada, H.Kobayashi, W.Urushibara Detection of hydrogen evolution during tensile deformation and fracture in carbon steel.- Materials transactions, vol.50, No 11.-2009.-P.2532-2540.
13. H.Hanada, T.Otsuka, H.Nasashima, S.Sasaki, M.Hayakawa, M.Sugisaki Profiling of hydrogen accumulation in a tempered martensite microstructure by means of tritium autoradiography.-Scripta Materialia 53 (2005) 1279-1284.
14. G.P.Shpenkow Friction surface phenomena/-Trib.series, 29 Elsevier, Amsterdam, 1995, 344 p.
15. S.Bechtle, M.Kumar, B.R.Somerday, M.E.Launey, R.O.Ritchie Grain-boundary engineering markedly reduces susceptibility to intergranular hydrogen embrittlement in metallic materials.-Acta Materialia.-57 (2009) p.4148-4157.
16. T.Otsuka, T. Tanabe Depth profilum of hydrogen in ferritic/martensitic steels by means of a tritium imaging plate technique.-Journal of alloys and Compounds.-580 (2013) 544-546.
17. Шаповалов В.И. Легирование водородом. – Днепропетровск: «Журфонд», 2013.–385 с.
18. Tau L, Chan S.L.I. Effect of ferrite/pearlite alignment on the hydrogen permeation in a AISI 4130 steel.-Materials Letters.- 20.– 1996.– P.143-147.
19. M.Warrier, A.Rai. R.Shneider, A time dependent model to study the effect of surface roughness on reactive-diffusive transport in porous media, J.Nucl.Mater.-390-391.-2009.-p.203-206.
20. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. М.:Машиностроение, 2009, 312 с.
21. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения.– Самара: Самар. гос. техн. ун-т., 2000.–268 с.
22. Шашкова Л.В. Фрагментации перлита стали 20 при нестационарной диффузии водорода.- Вестник ОГУ.- №6.- 2007.-С.137-141.

Стаття надійшла до редакції 31.03.2016.